

# Planety trojańskie w pozasłonecznych układach planetarnych

K. Goździewski, C. Migaszewski, A. Musieliński

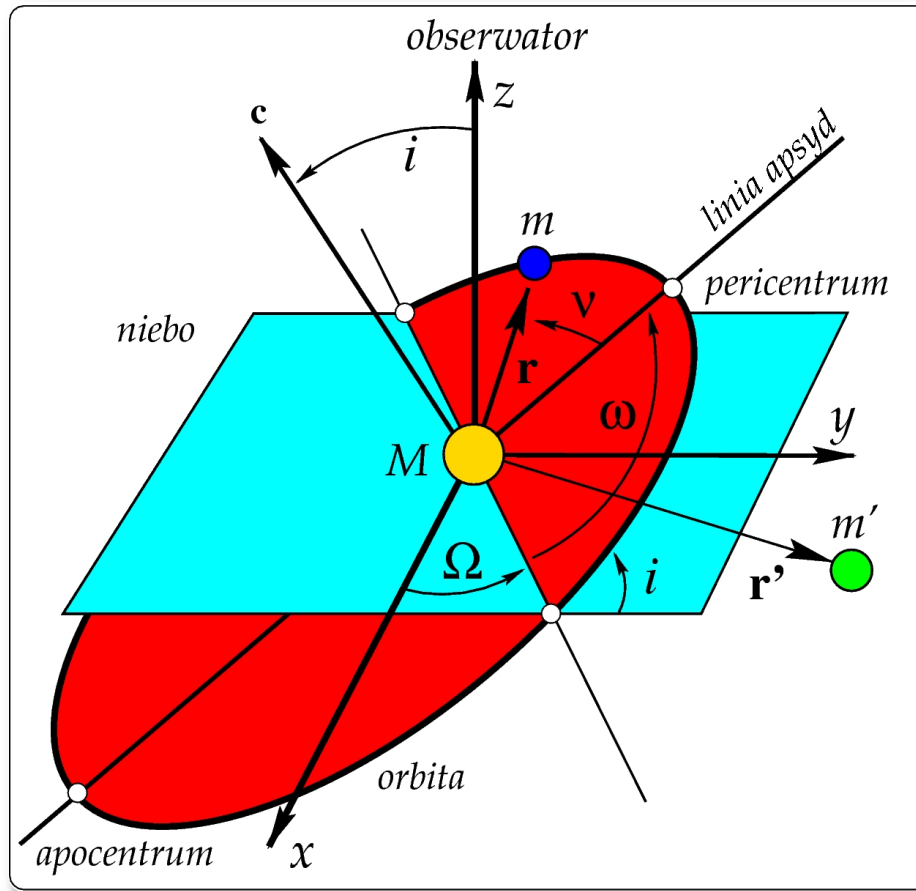
Centrum Astronomii UMK, Toruń

HARDY

# Plan

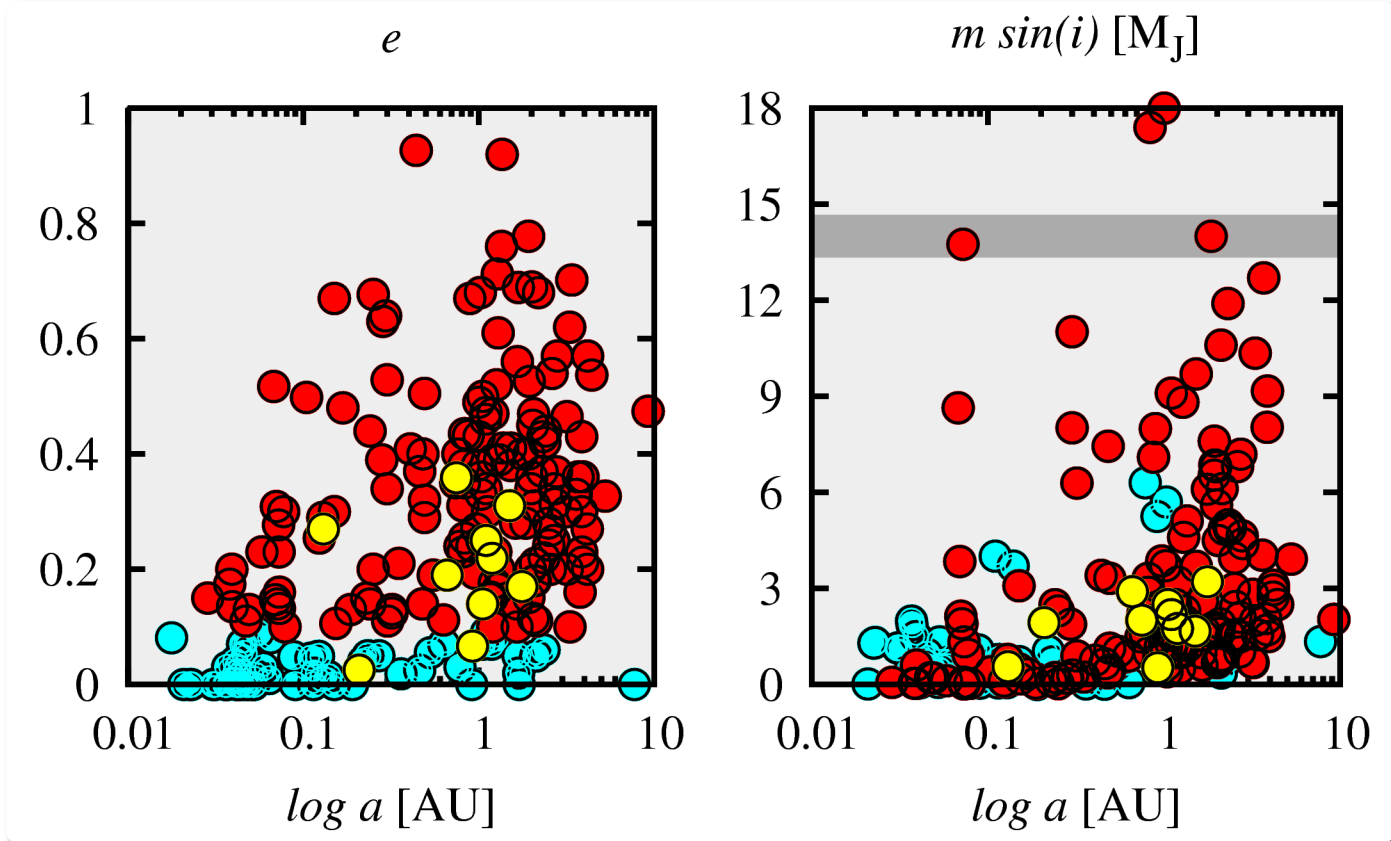
- Statystyka pozasłonecznych układów planetarnych
- Obiekty trojańskie w Układzie Słonecznym
- Trudności w interpretacji pomiarów RV
- HD 160691  $\mu$  Ara: analog Układu Słonecznego?
- Analiza RV HD 82943, HD 73526, HD 128311
- $\tau$  Gruis: „płaski” rezonans 1:1?
- Podsumowanie

# Elementy Keplera i prędkość radialna (RV)



$$V_r(t) = \sum_p K_p [\cos(\omega_p + \nu_p(t)) + e_p \cos \omega_p] + \sum_o V_o$$

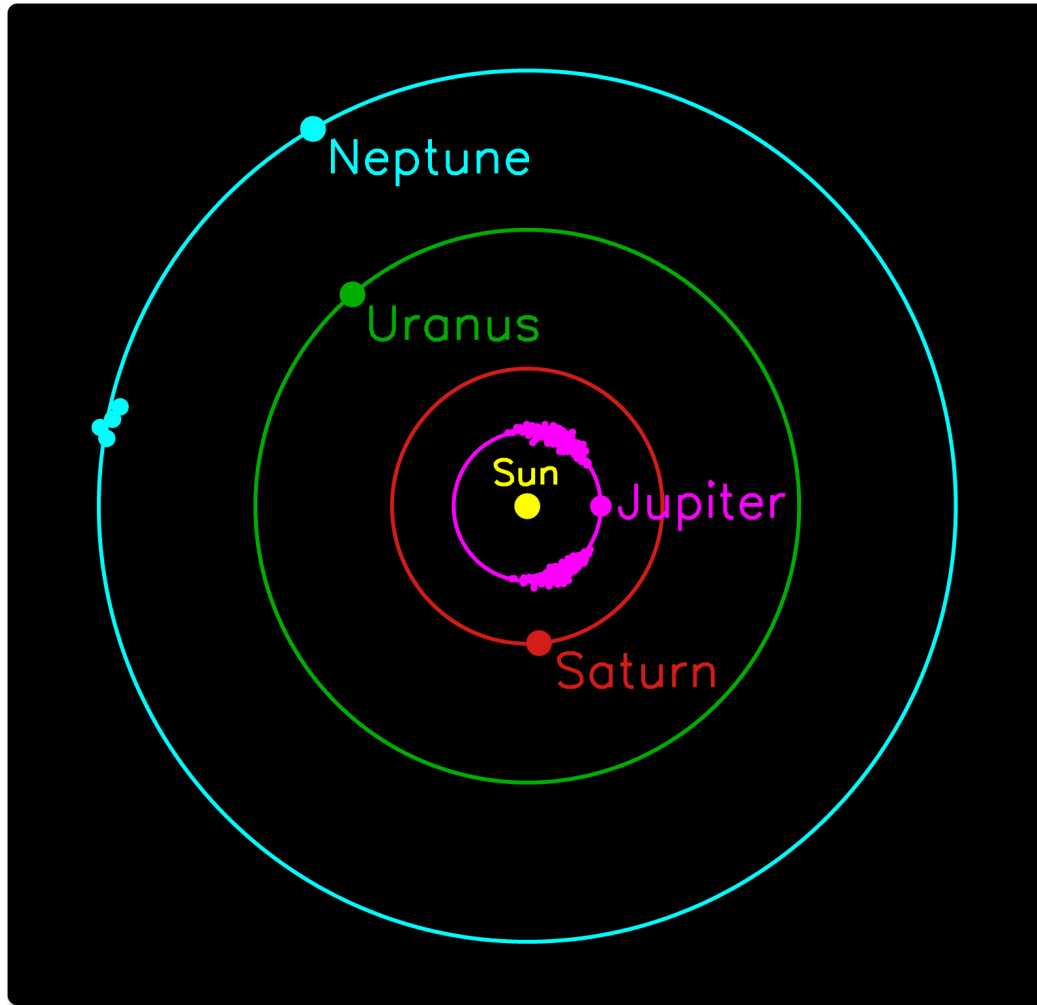
# Aktualna statystyka (IX, 2007)



~ 256 planet, 26 układów wielokrotnych

5 układów w rezonansie ruchów średnich 2:1

# Obiekty trojańskie w Układzie Słonecznym I



# Obiekty trojańskie w Układzie Słonecznym II

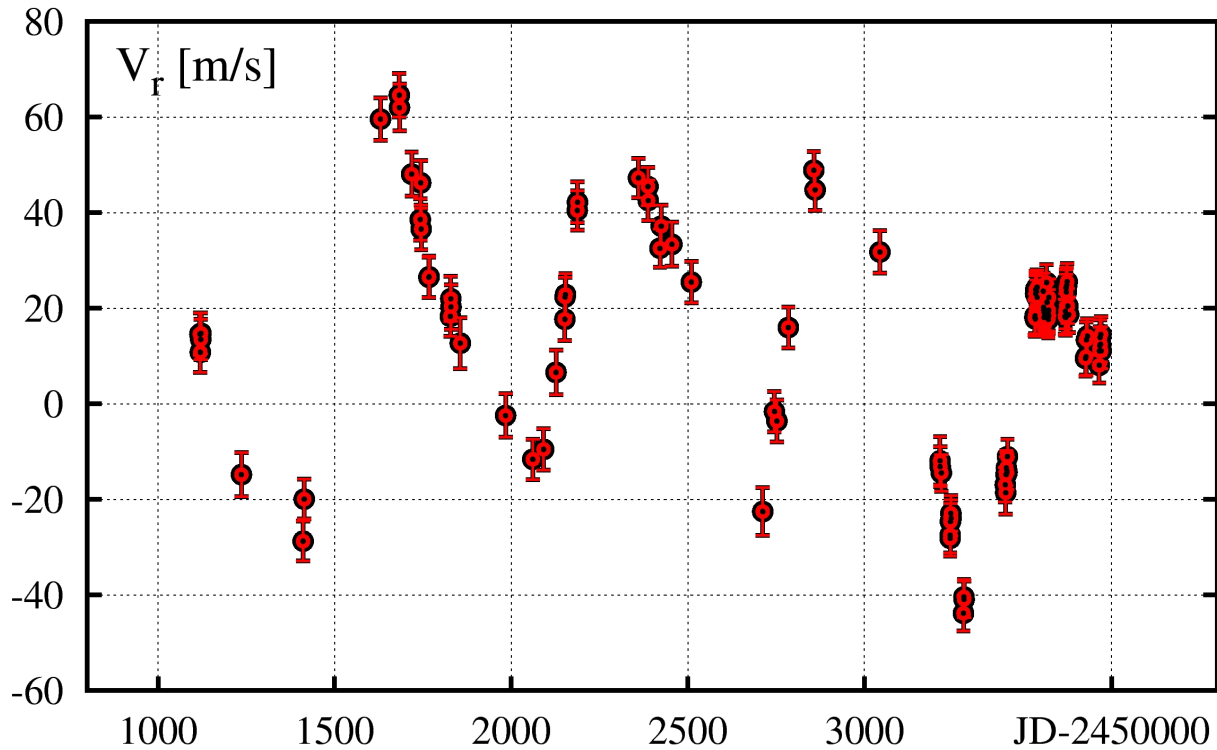
- **Euler i Lagrange** uzyskali nagrodę Paryskiej Akademii Nauk w 1722 r. za prace o orbicie Księżyca. W eseju Lagrange'a znalazły się rezultaty dotyczące położenia równowagi w problemie 3 ciał.
- Najlepiej znane: asteroidy **trojańskie** i **greckie** (w pobliżu **punktów libracyjnych**  $L_4, L_5$  układu Słońce–Jowisz, około 600 obiektów). Inne przykłady:



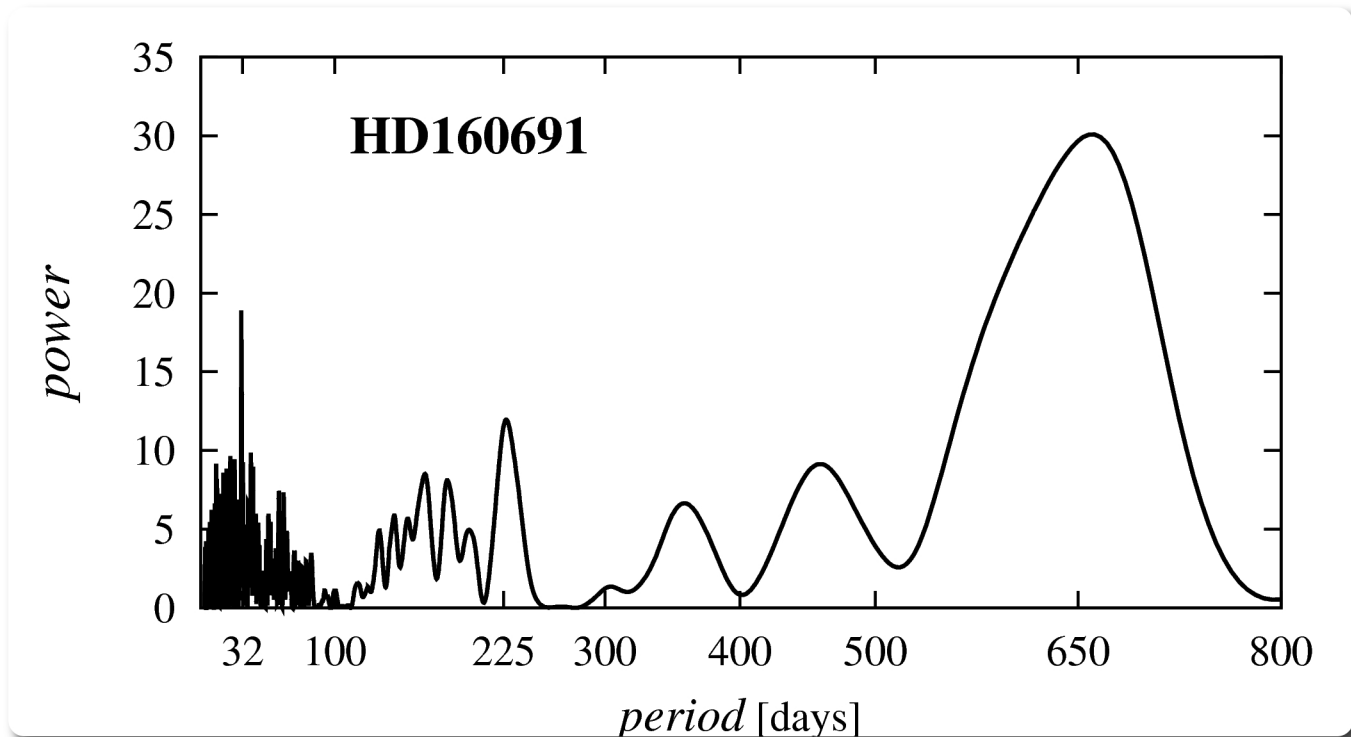
- asteroidy koorbitalne z **Neptunem** (w tym 3 obiekty odkryte w 2006 r!),
- 5261 **Eureka** ( $L_4$  układu Słońce-Mars),
- 3753 **Cruithne** (koorbitalny satelita Ziemi),
- księżyce **Helena** i **Polydeuces** ( $L_4, L_5$  Saturn-Diona),
- księżyce **Telesto, Calypso** ( $L_4$  Saturn–Tetys),
- księżyce koorbitalne Saturna: **Janus** oraz **Epimetheus**,
- **księżyce pyłowe Kordylewskiego** (punkt  $L_4$  Ziemia–Księżyc).

**Konfiguracje trojańskie powstają łatwo i są stabilne dynamicznie.**

# RV $\mu$ Arae (Butler et al., 2006): $\sigma \sim 1$ m/s !



# Periodogram RV Lomba-Scargle's ( $\mu$ Ara)



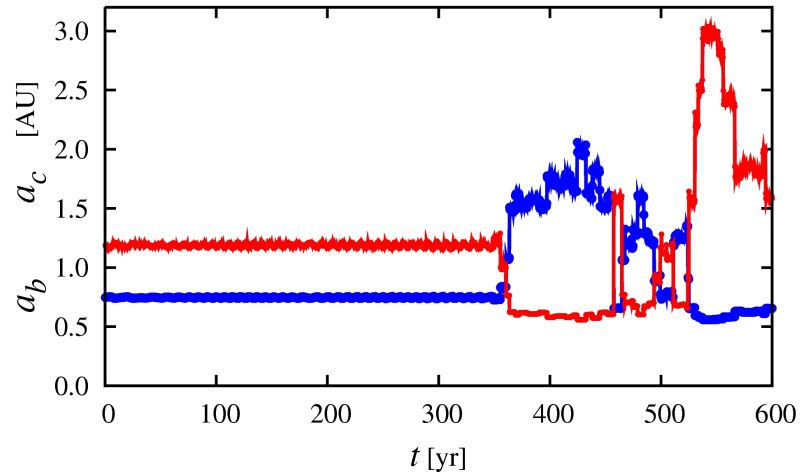
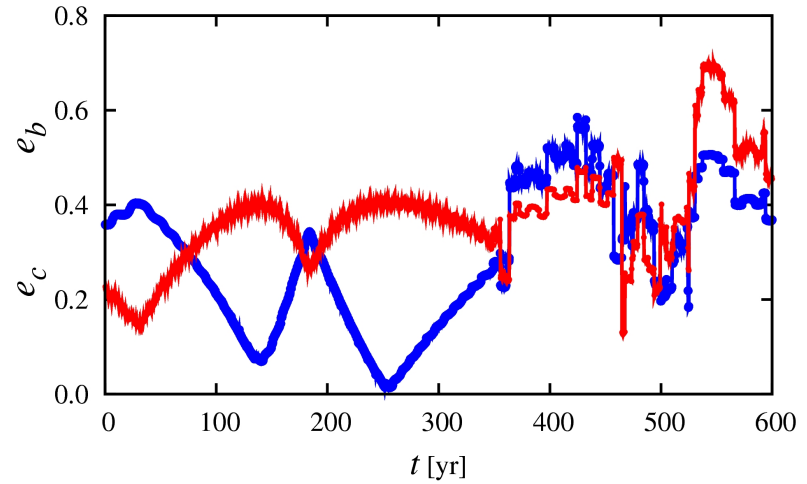
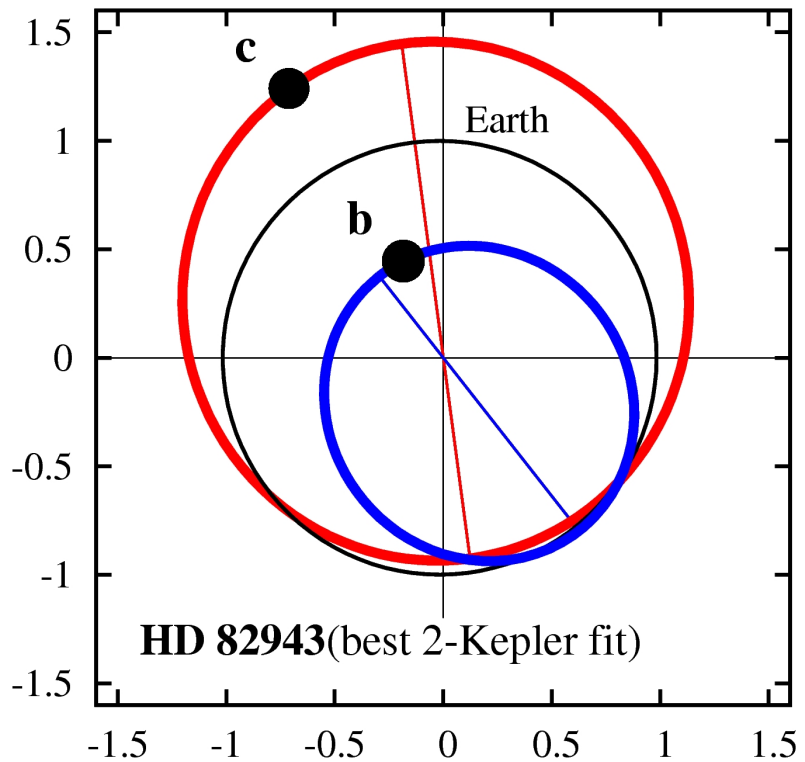


# Modele sygnału Dopplera (RV)

- **model Keplera** (kinematyczny):  
**geometryczne** złożenie orbit astrocentrycznych wyrażone przez elementy Keplera (Smart, 1949) — **nie uwzględnia oddziaływań planetarnych!**
- **model Newtona** (dynamiczny):  
pełny model ruchu  $N$ -ciał — **uwzględnia oddziaływania grawitacyjne** (Laughlin&Chambers, 2001).
- **uogólniony model Newtona** (twierdzenie KAM):  
przestrzeń fazowa ma nieciągłą i złożoną strukturę ze względu na więzy **stabilności** wiekowej (algorytm GAMP).

# Zasada kopernikańska

## HD 82943 (Swiss Team)



# Algorytm GAMP (ApJ, 2004)

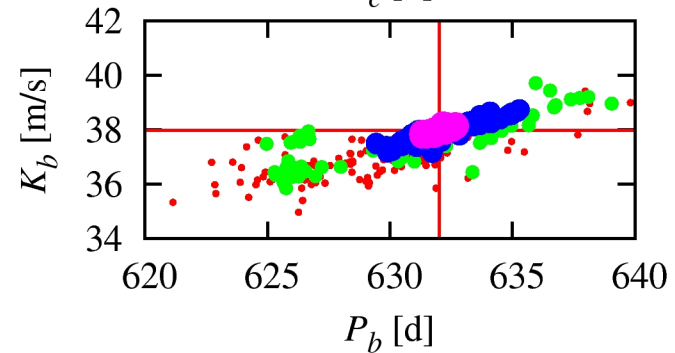
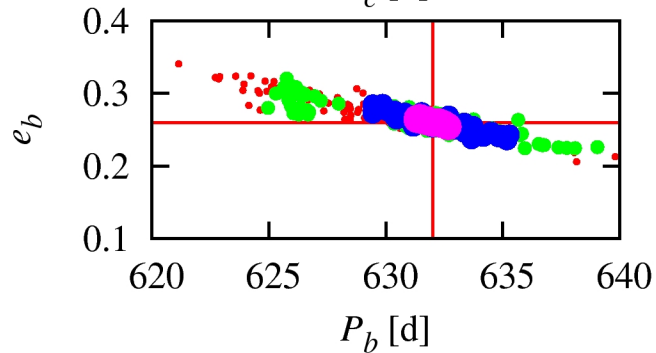
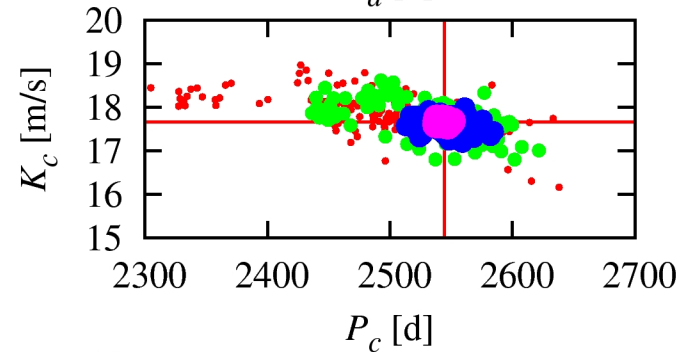
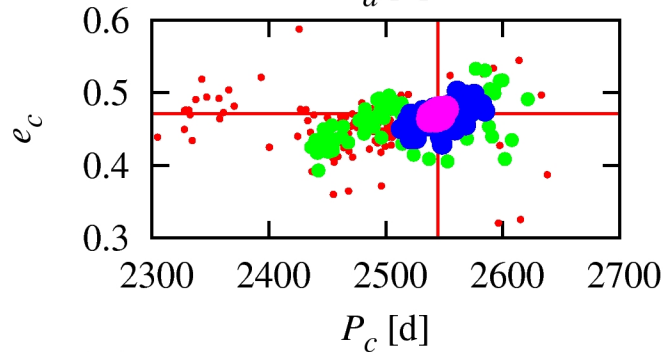
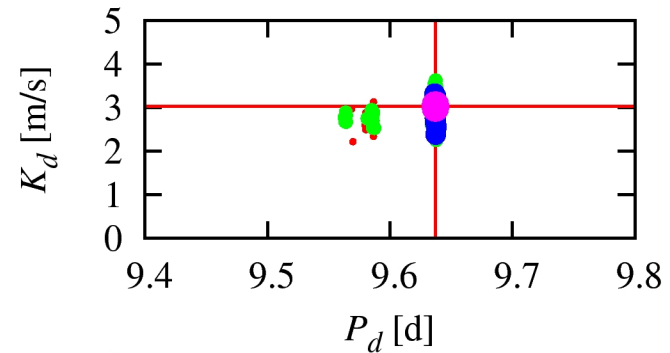
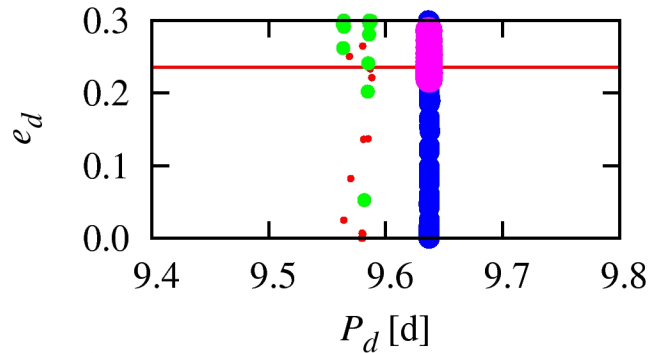
- Quasi-globalna, odporna metoda minimalizacji w wielowymiarowej i nieciągłej przestrzeni warunków początkowych: **Genetic Algorithm** (Holland, ~ 1960)  
+
- **Szybki indykator**: Mean Exponential Growth factor of Nearby Orbits (**MEGNO**) (Cincotta & Simó, 2000)  
≡
- Genetic Algorithm with MEGNO Penalty (**GAMP**)

Stabilność układu  $\equiv$  dodatkowa **obserwabla**:

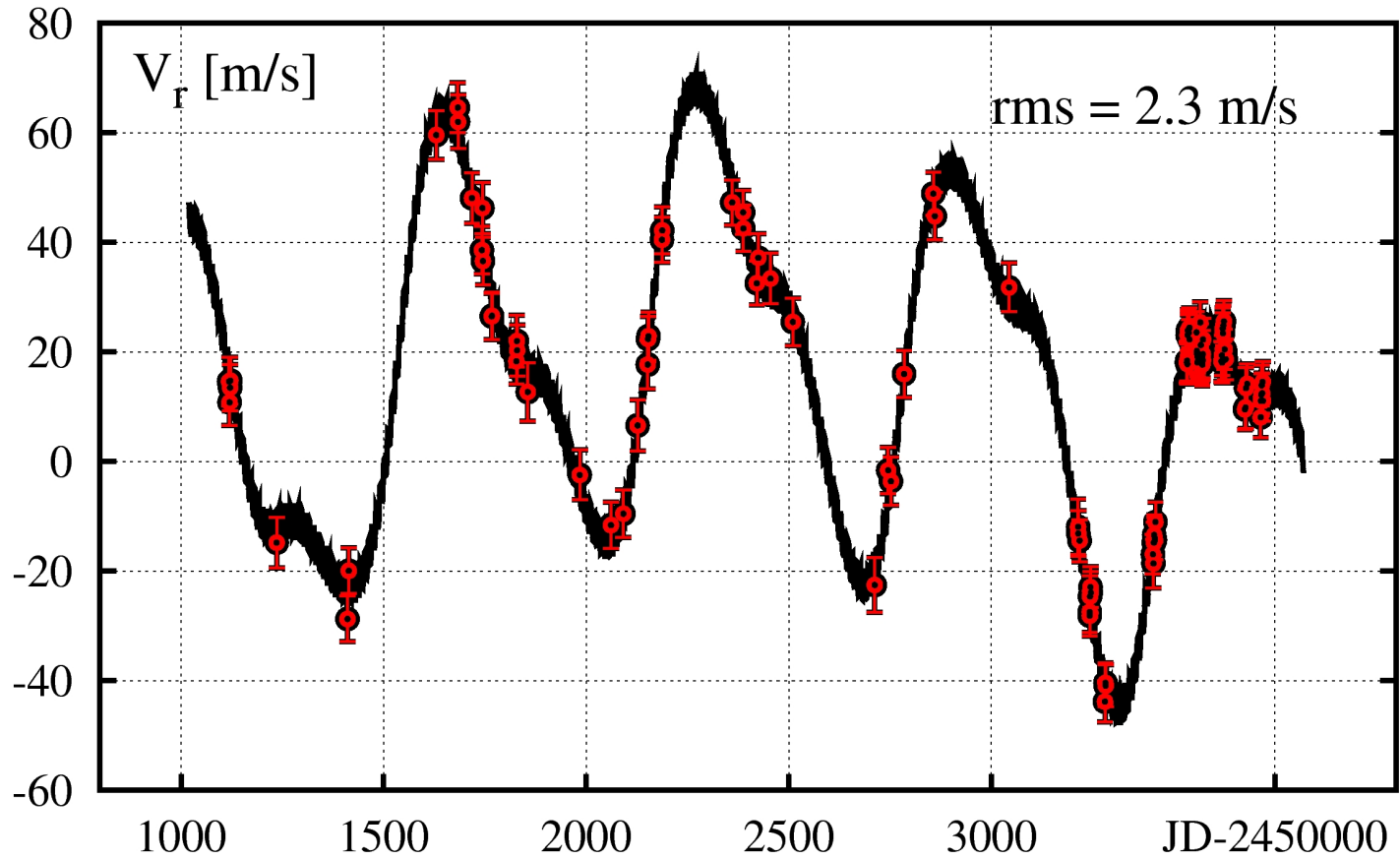
$$(\chi_\nu^2)^{1/2} \rightarrow (\chi_\nu^2)^{1/2} + p,$$

$p \neq 0$  dla rozwiązań niestabilnych ( $p$  — funkcja „kary”).

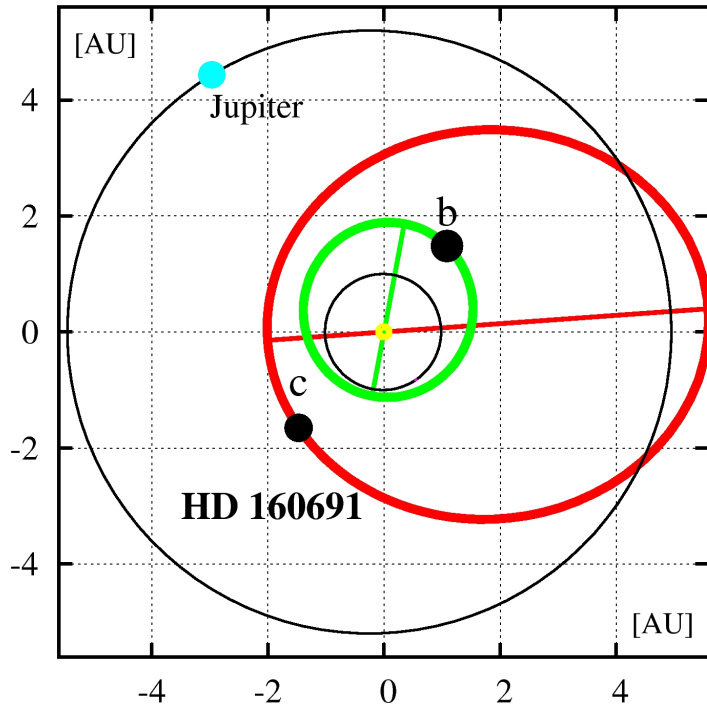
# Optymalizacja *hybrydowa* (GA+simplex)



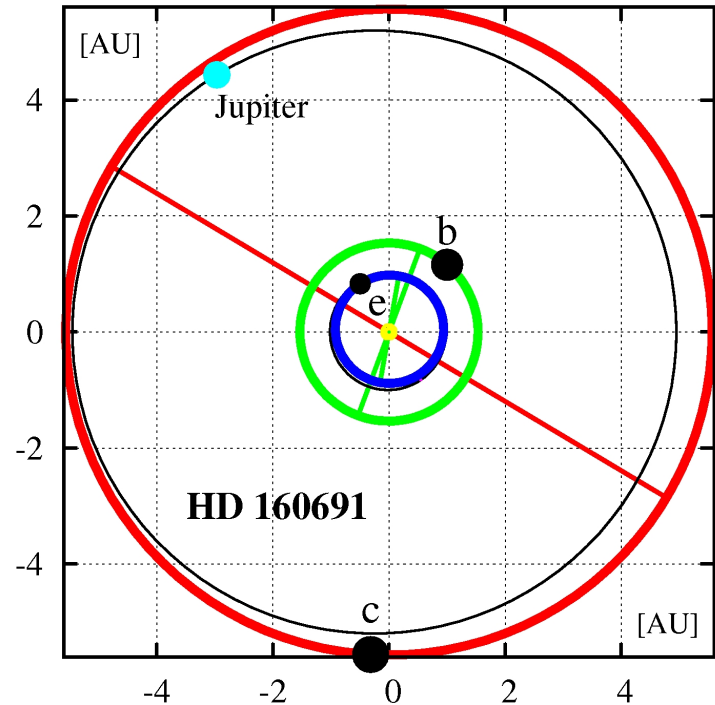
# $\mu$ Arae: nowa planeta jowiszowa ?!



# Alternatywne konfiguracje orbitalne $\mu$ Ara

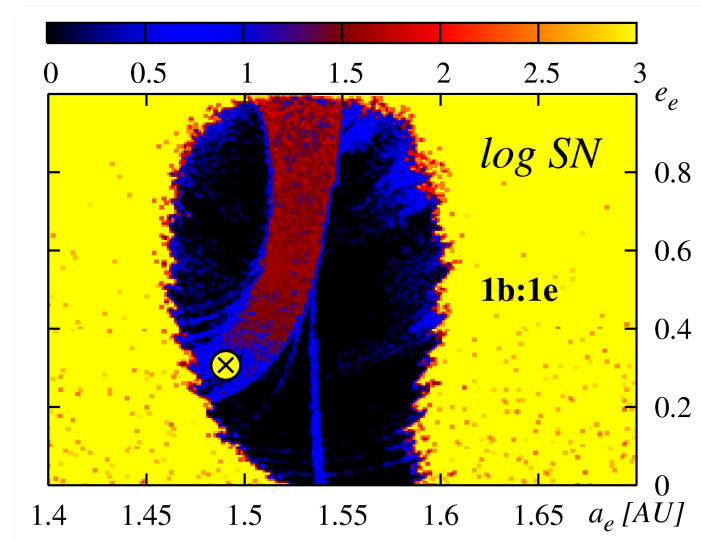
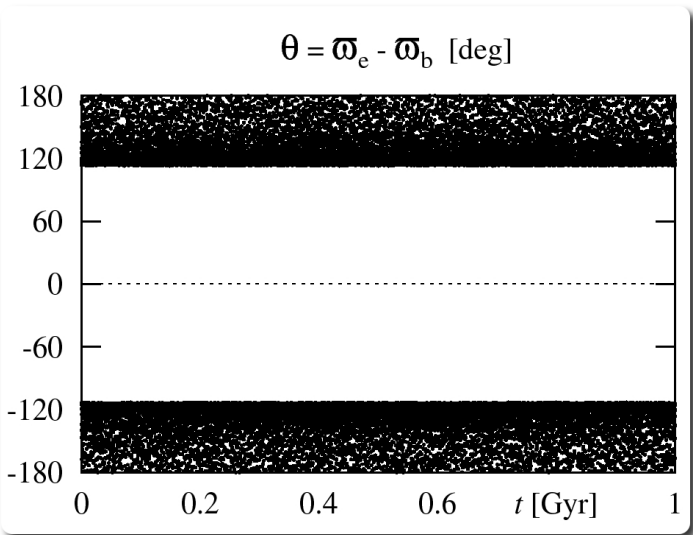
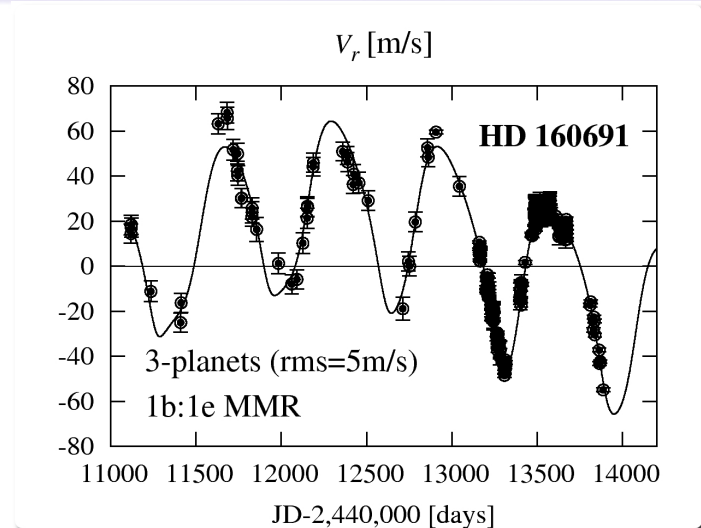
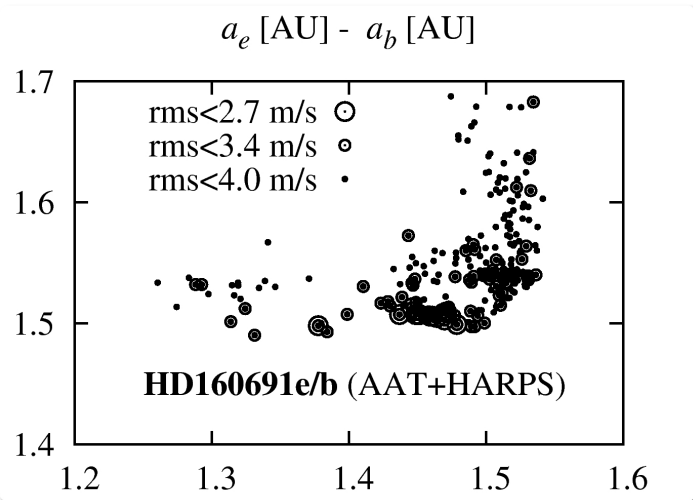


**układ 3 planetarny**  
rms 4 m/s  
duże mimośrodory orbit  
na granicy stabilności  
silny rezonans (4:1)

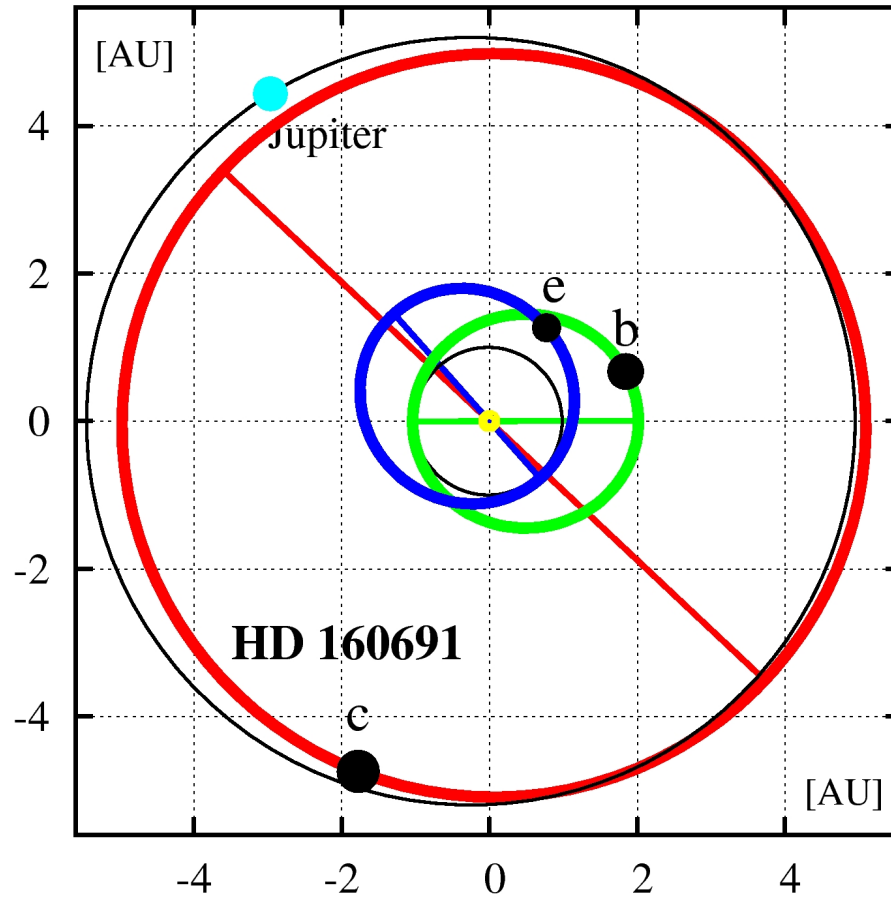


**układ 4 planetarny (analog US)**  
rms 2.3 m/s  
niemal kołowe orbity  
pas asteroid (2–4 AU)?  
planeta HD160691e w ekostrefie

# Hipoteza stabilnega rezonansu 1e:1b ( $\mu$ Arae)

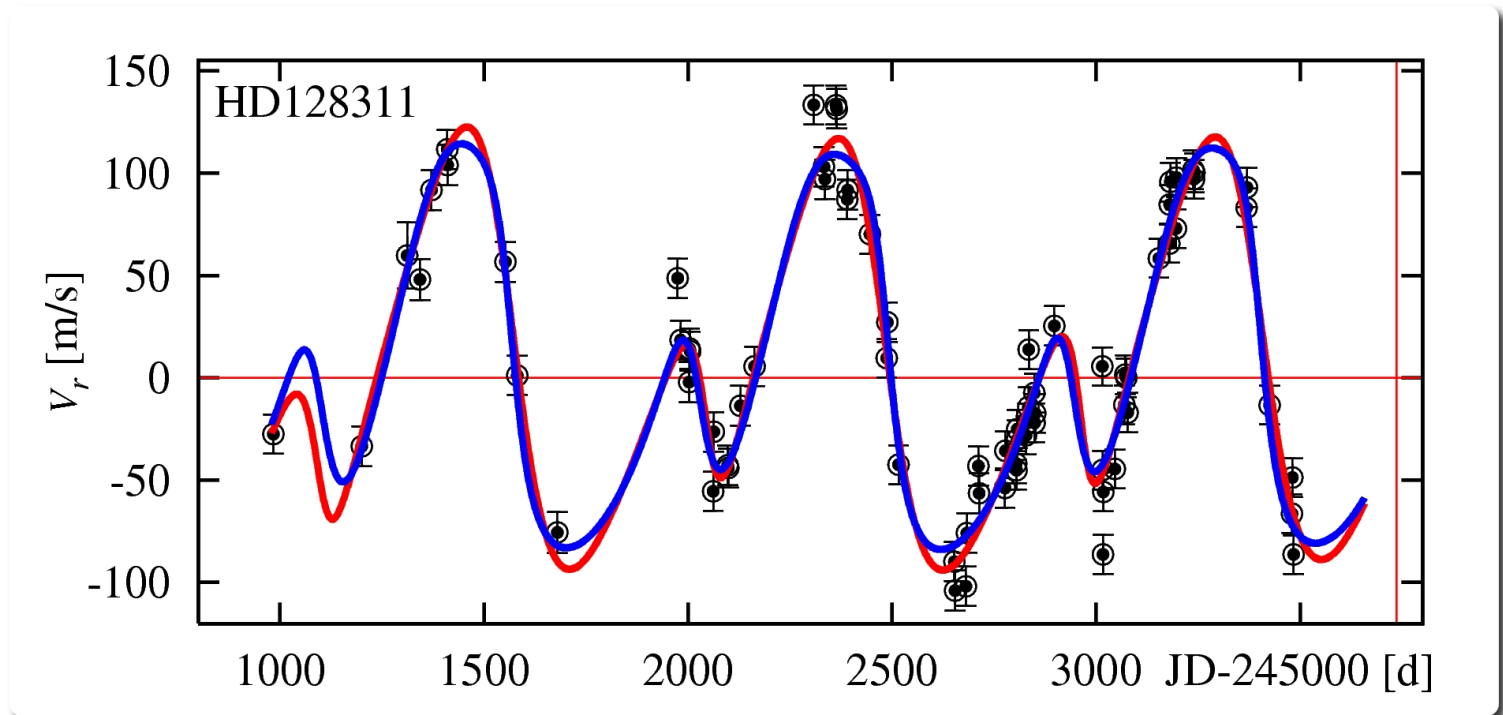


# Planety trojańskie $\mu$ Ara: konfiguracja orbit





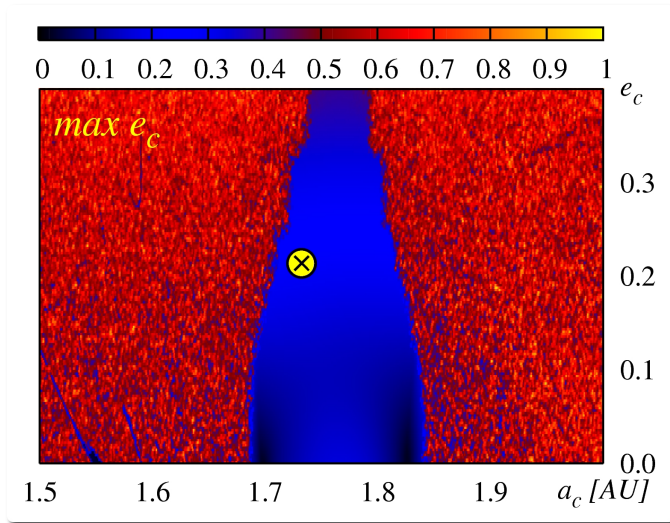
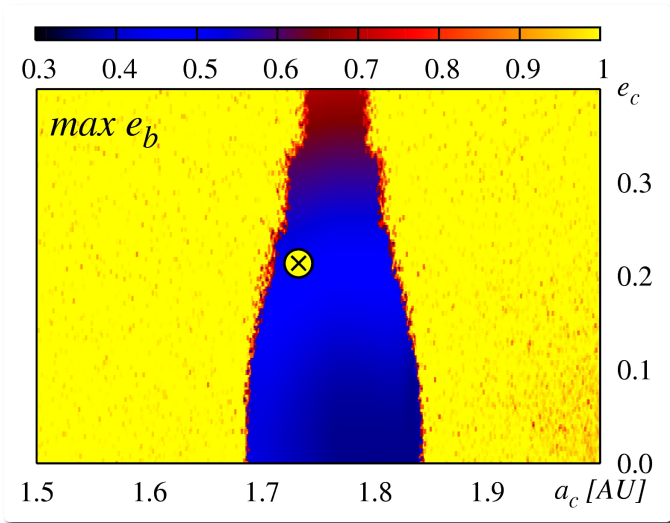
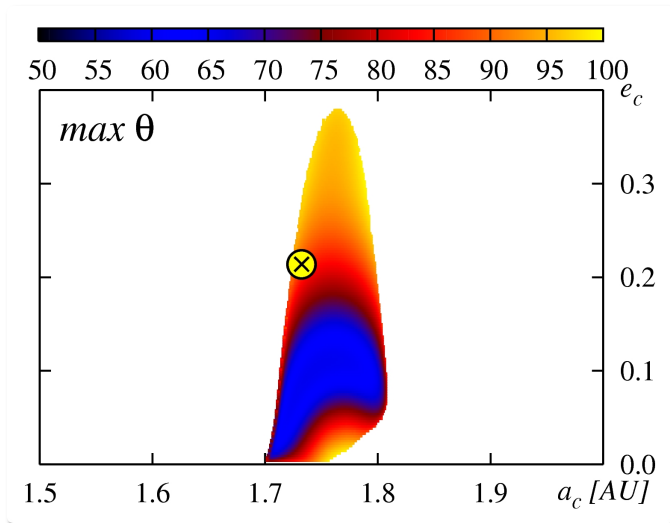
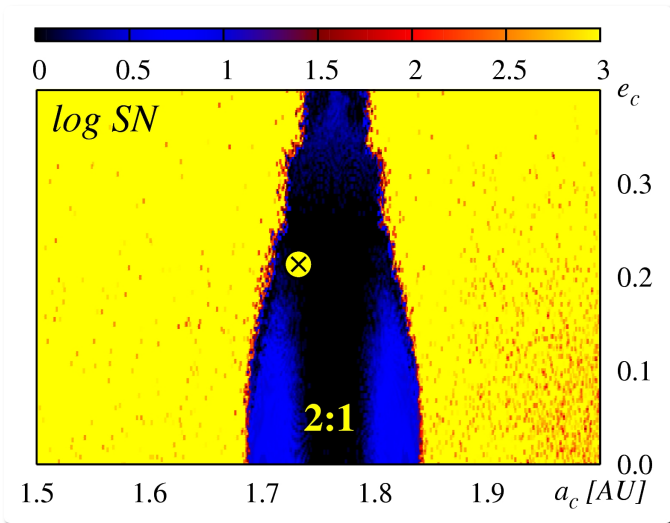
# RV dla HD 128311 (Vogt, 2005) i dwa rozwiązania



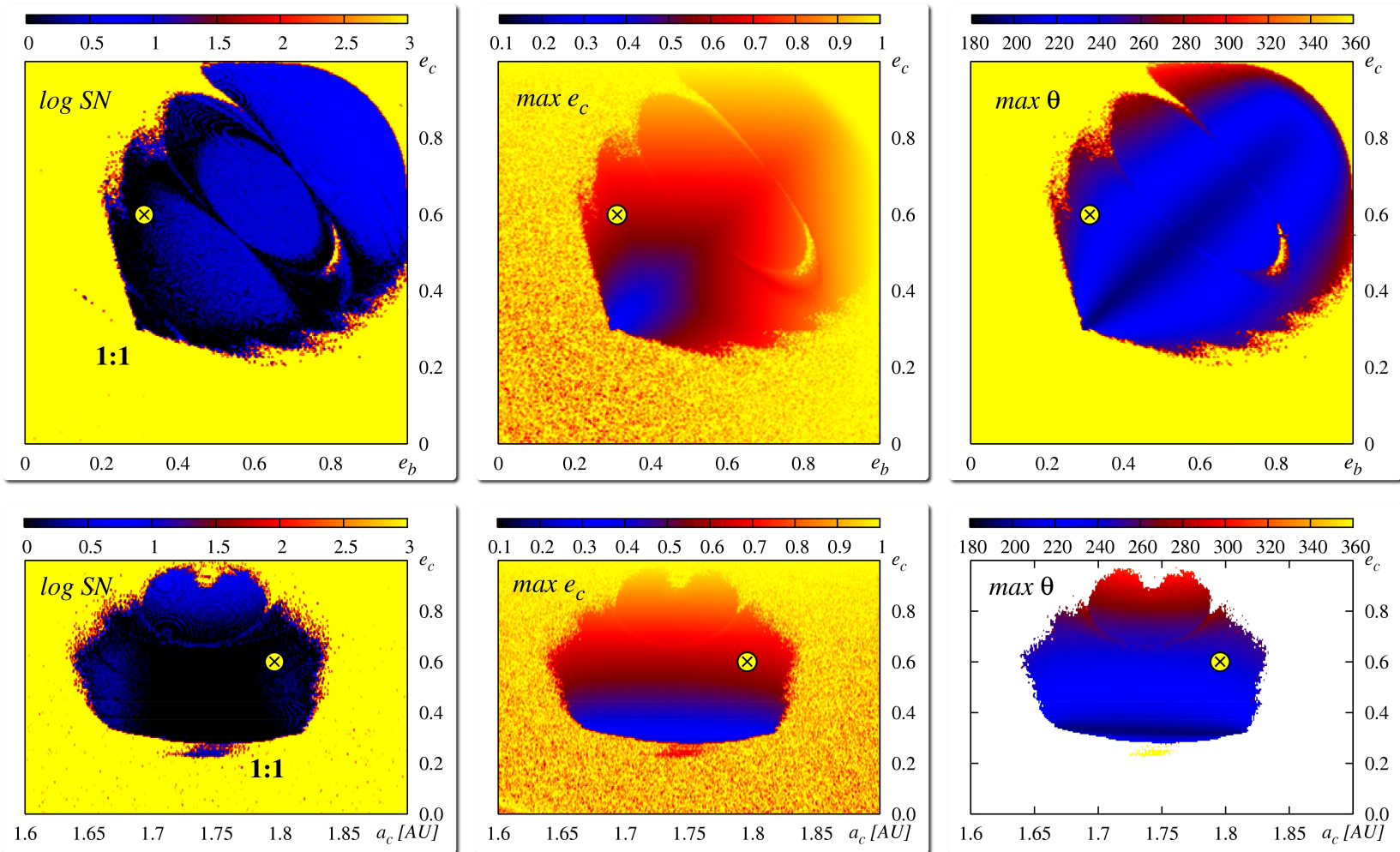
Stabilne konfiguracje (GAMP, rms  $\sim 15$  m/s)

- rezonans ruchów średnich **2:1**,
- rezonans ruchów średnich **1:1**.

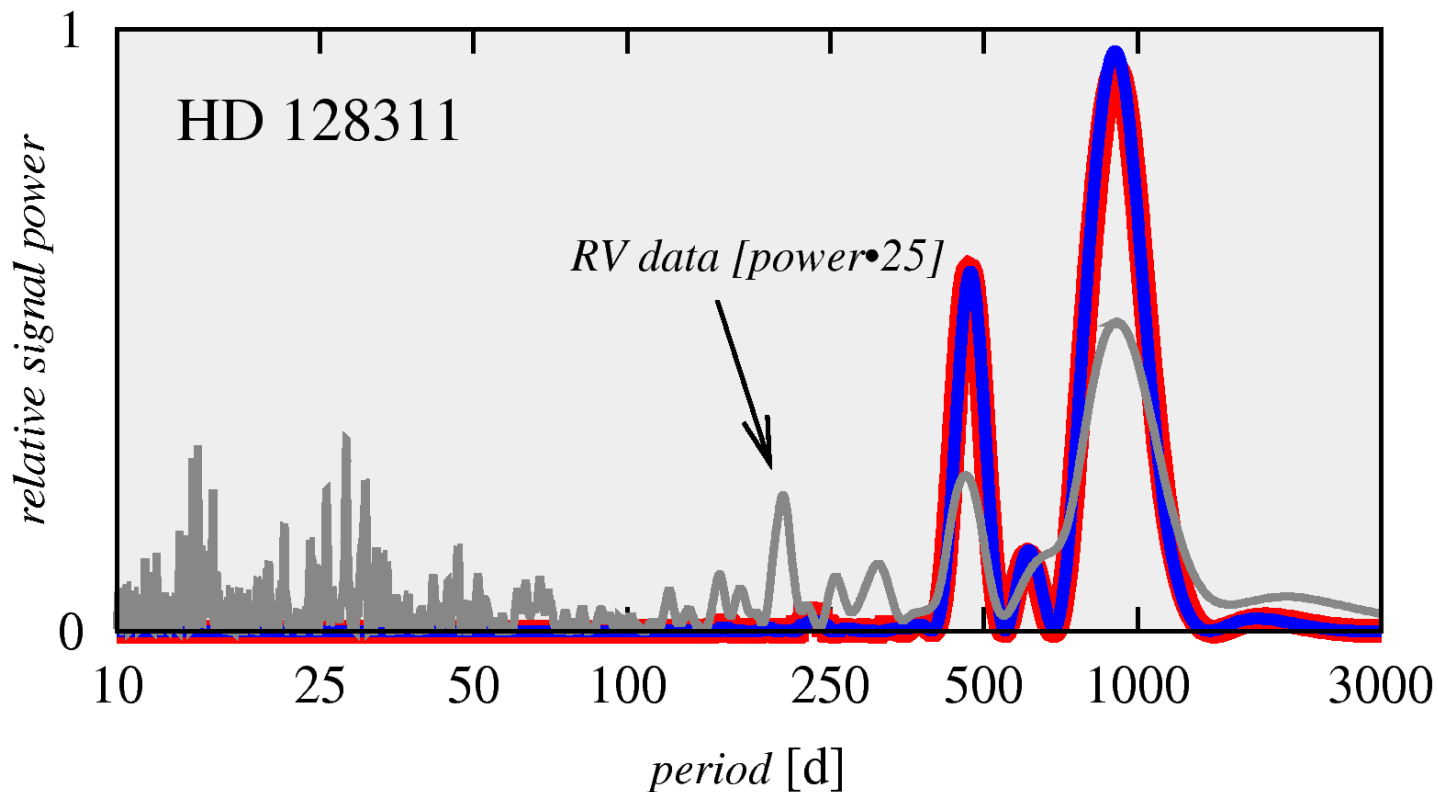
# Rezonans 2:1 w układzie HD 128311



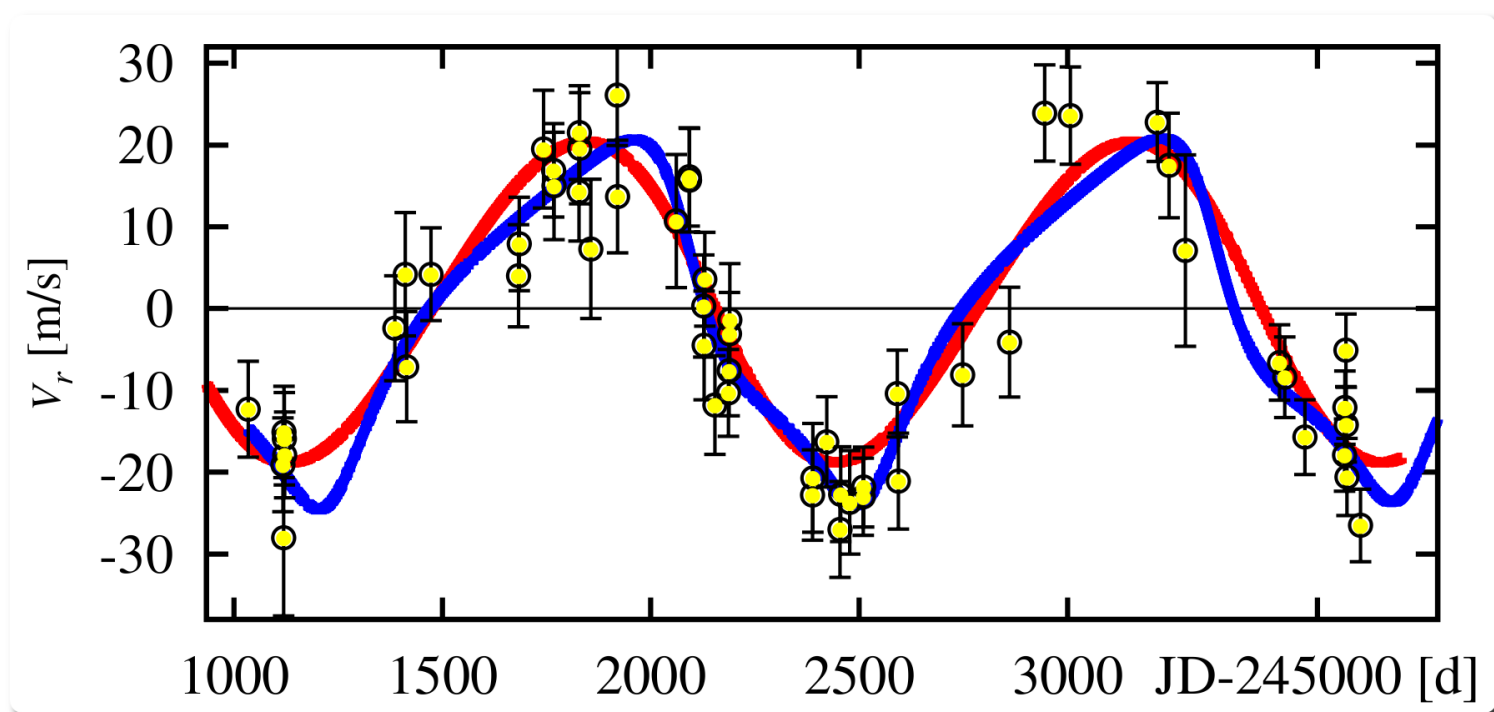
# HD 128311 — rezonans 1:1?



# HD 128311 — periodogram RV Lomba-Scargle'a

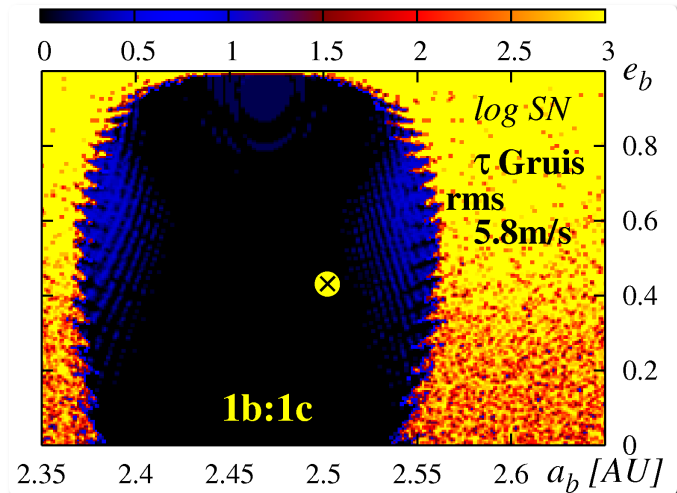
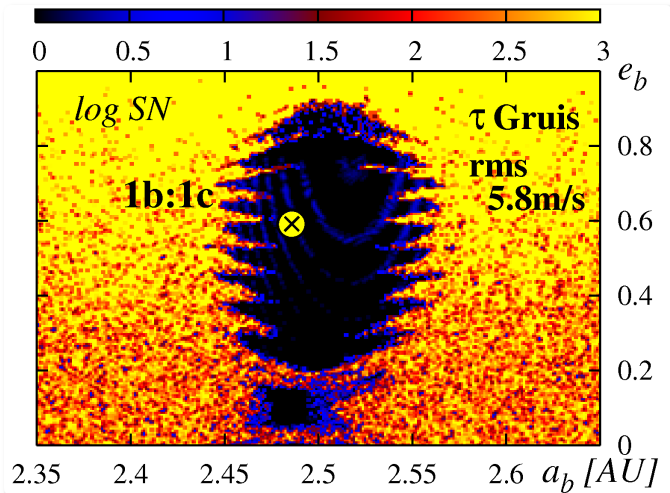
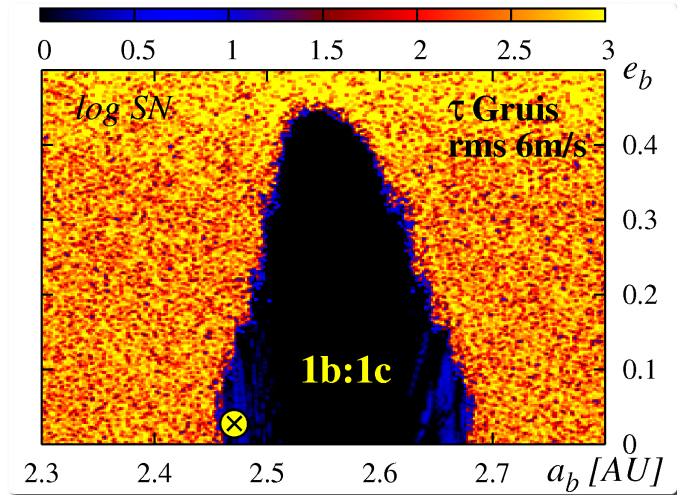
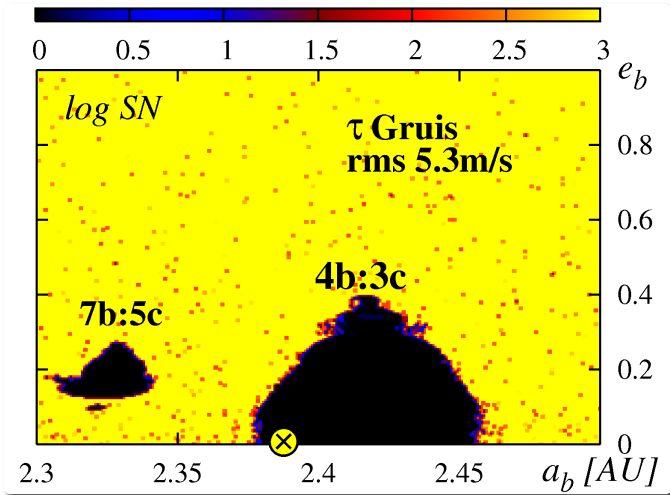


# Modele obserwacji RV $\tau$ Gruis

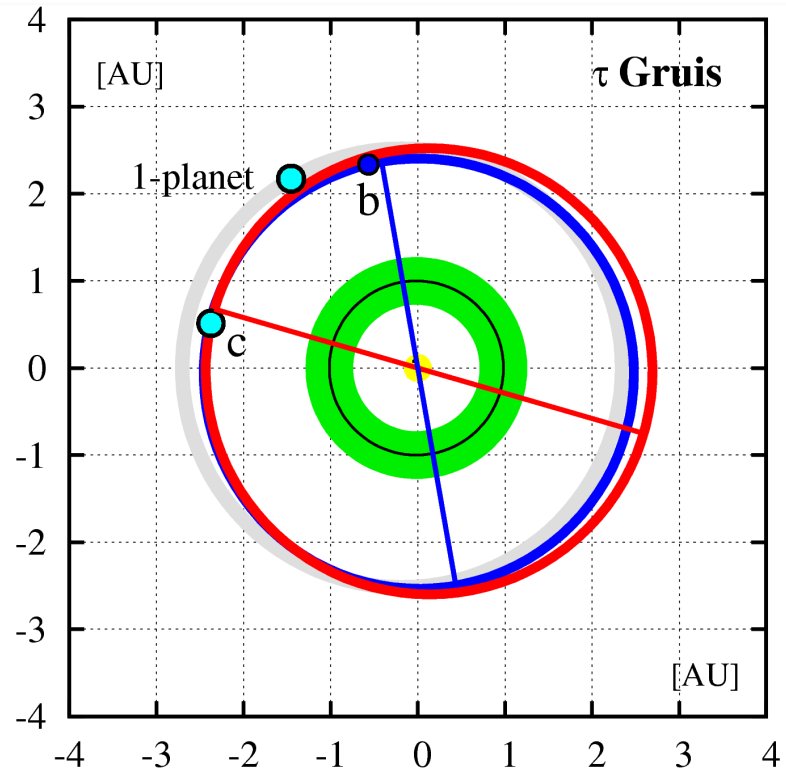
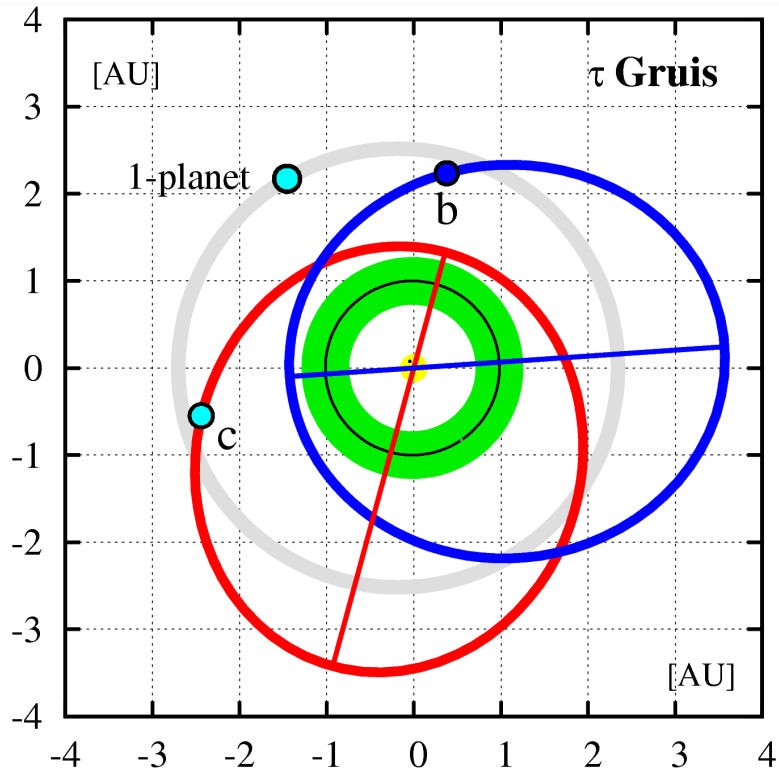


Obserwacje AAT (Butler, 2006) oraz krzywe syntetyczne dla konfiguracji orbit: z **jedną** planetą jowiszową oraz **dwoma** planetami jowiszowymi w **rezonansie 1:1**. Obydwa rozwiązania mają podobną wartość rms  $\sim 6$  m/s.

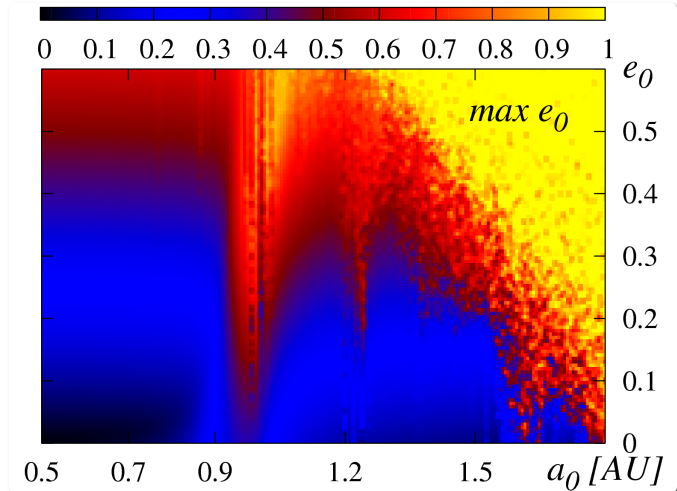
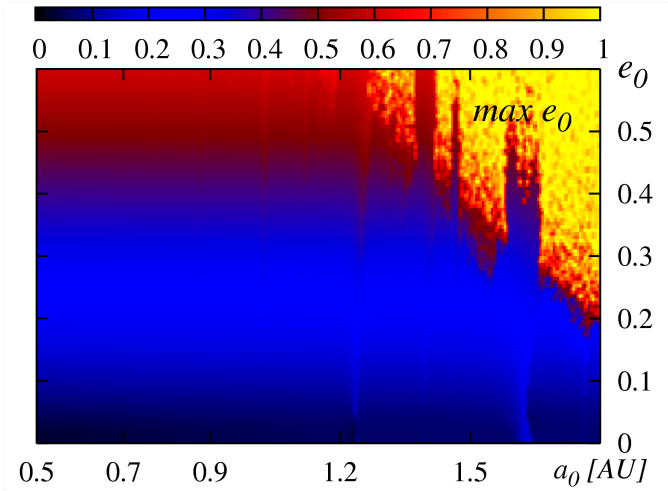
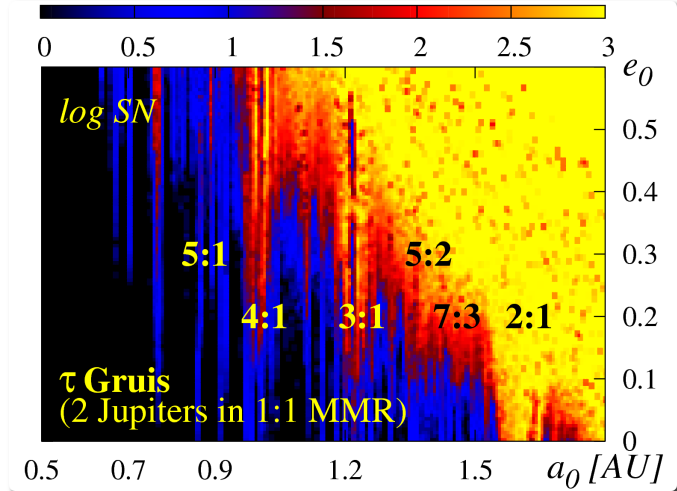
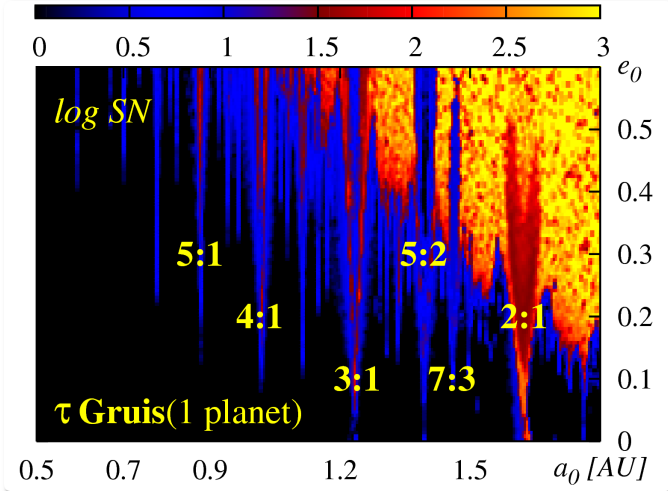
# Planety trojańskie w układzie $\tau$ Gruis



# Przykładowe konfiguracje orbitalne $\tau$ Gruis

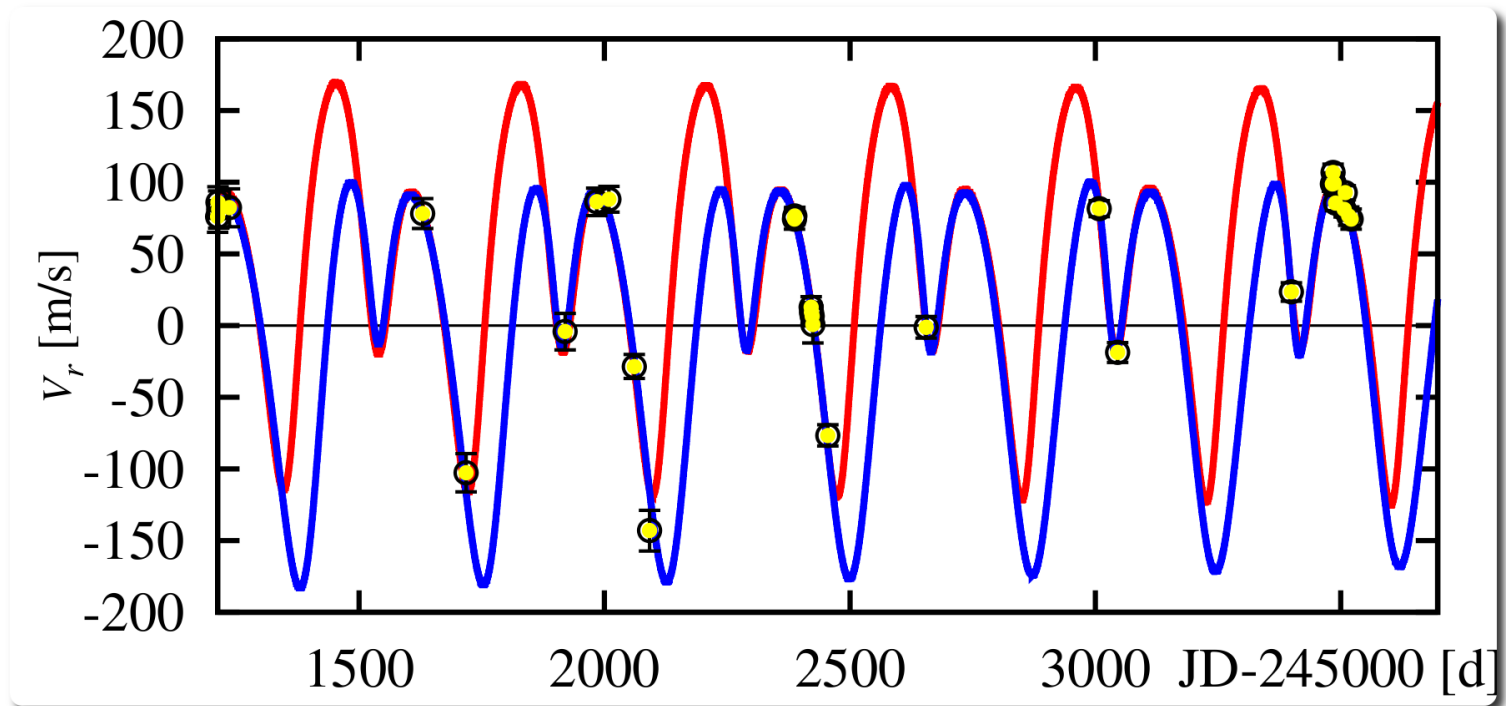


# $\tau$ Gruis: konsekwencje dla planet ziemskich





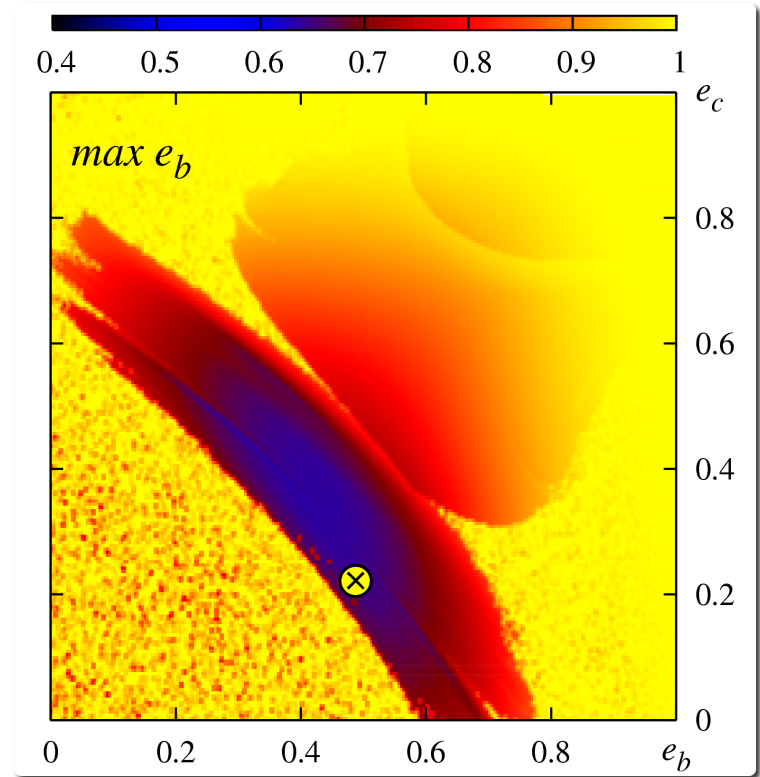
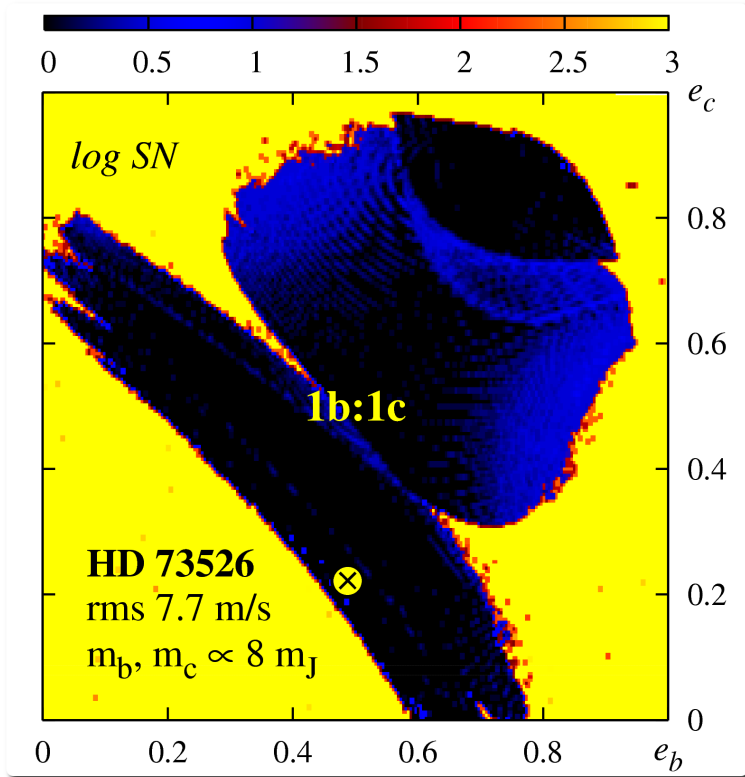
# HD 73526 (Tinney, 2006) i dwa rozwiązania



Stabilne konfiguracje (GAMP, rms  $\sim 7$  m/s)

- rezonans ruchów średnich **2:1**,
- rezonans ruchów średnich **1:1**.

# Stabilność konfiguracji trojańskiej HD 73526



# Podsumowanie

- Obiekty trojańskie są powszechne w Układzie Słonecznym.
- Obecna teoria dopuszcza powstawanie planet trojańskich wokół gwiazd typu słonecznego w wyniku **rozpraszania zderzeniowego** lub **procesów hydrodynamicznych** w dysku protoplanetarnym.
- Pomiarów metodą Dopplera są **zdegenerowane**: ze względu na **nieokreśloność mas** i **długości węzłów** a także **ilość** planet w układzie i potencjalnie mnogie konfiguracje orbitalne.
- Analiza obserwacji RV nie wyklucza, że część systemów, którym przypisywany jest rezonans ruchów średnich 2:1, w rzeczywistości zawiera planety trojańskie na orbitach o **dużym nachyleniu względnym**.
- Sygnał Dopplera przypisywany planecie na orbicie kołowej może **ukrywać** obiekty trojańskie.
- Elementy orbitalne uzyskane na bazie obserwacji i ich analizy = klucz do genezy i ewolucji układów planetarnych.

**Merci pour votre attention!**

